



Propuesta de un índice de escurrimiento potencial basado en el método del CN, imágenes satelitales y SIG

Proposal of a potencial runoff index based on CN method, satellite image and GIS

Presutti, Miriam ¹ ✉ - Barrera, Daniel ²⁻³ - Rosatto, Héctor ³

Recibido: 01 de Julio de 2011 • Aceptado: 05 de Diciembre 2011

Resumen

En este trabajo se propone un índice para la estimación del escurrimiento superficial potencial a partir de imágenes satelitales, basado en la clasificación de suelos, vegetación y tratamiento (SVT) utilizada en el cálculo del CN. Para ello, se siguió una secuencia de operaciones aplicada en cada píxel para generar cuatro mapas: i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica: obtenido a través de la clasificación ISÓDATA de datos satelitales corregidos radiométrica y geoméricamente (reflectancia) en conjunto con los índices de vegetación y nuevas bandas obtenidas por la transformación Tasseled Cap; ii) Mapa de Número de Curva: al mapa anterior se le suman los datos de grupo hidrológico de suelos para así generar un nuevo mapa donde cada clase SVT tiene asignada un valor de CN.; iii) Mapa de pendientes: generado a partir del DEM del SRTM de 90 m remuestreado a 30m y iv) Mapa de Índice de Escurrimiento Potencial: aplicando una ecuación aquí propuesta utilizando como ingreso los mapas anteriores. Los resultados, utilizando imágenes LANDSAT TM, demostraron que es posible elaborar un mapa del índice potencial de escurrimiento de un área en un momento específico. La metodología desarrollada ofrece una herramienta de altísima definición a nivel de cuenca al determinar los escurrimientos potenciales en cada área elemental o píxel.

Palabras clave: *Escurrimiento superficial potencial, número de escurrimiento, imágenes satelitales.*

Abstract

In this work an index is proposed to estimate the potential surface runoff using satellite images data. The proposed index is based on the soil classification, and the soil-vegetation treatment (SVT) used in the CN calculation. For that purpose, a sequence was followed and applied to all pixels to generate four maps:

¹ Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.60 y 118 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.Tel: + 54-221-4236616

✉ presutti@agro.unlp.edu.ar

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Rivadavia 1917, Capital Federal

³ Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, Capital Federal - CP: 1417. Tel.: 54-11-45248008

i) *Land use and hydrological condition map*: obtained by ISODATA classification of radiometric and geometrically corrected satellite data (reflectance) in conjunction with vegetation indexes and new bands created with the Tasseled cap Transformation. ii) *Curve Number map*: to the previous map an hydrological group of soil data is added, in order to generate a new map where each SVT class has a CN value; iii) *Slope map*: created from SRTM DEM 90 m resampled to 30 m and iv) *Potential Runoff Index map*, by applying the equation proposed here using the previous maps as inputs. The results, using Landsat TM data, have demonstrated that it is possible to make a potential runoff index map for an area at a given time. The developed methodology offers a very high definition tool to determine the potential runoff at each elementary area or pixel at watershed level.

Keywords: Potential runoff, curve number, satellite images.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de generación del escurrimiento superficial intervienen factores que caracterizan la magnitud de la crecida y entre ellos, la infiltración es de fundamental importancia, ya que separa el escurrimiento directo del subterráneo. El escurrimiento potencial -el máximo posible- para un área de terreno con ciertas características topográficas, edafológicas y de cobertura dadas, es uno de los parámetros más frecuentemente utilizados en la simulación de inundaciones o mapas de riesgo hídrico. El escurrimiento puede generar erosión si su volumen supera determinado umbral y existen condiciones adecuadas para ello. La erosión hídrica, a su vez, provoca la pérdida del horizonte superior del suelo, generando una disminución de la productividad de dicho suelo y aumentando además las condiciones favorables al escurrimiento. El grave impacto ocasionado sobre el ambiente hace necesaria la búsqueda de nuevos métodos de control, en especial, aquellos relacionados con el cálculo o estimación del escurrimiento potencial de un área en un momento dado. El volumen de escurrimiento está determinado por diferentes variables, tales como precipitaciones, área contribuyente, infiltración y evapotranspiración. Su interacción en tiempo y espacio hace difícil su medición (Singh 1992). Por ello, el cálculo o estimación del escurrimiento debe hacerse bajo métodos que reflejen correctamente la interacción entre dichas variables.

Se han desarrollado diversos métodos para la obtención del escurrimiento superficial en una cuenca hídrica. Uno de los modelos conceptuales más utilizados es el método propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS) de los EEUU, actualmente *Natural Resource Conservation Service*. (NEH-4 1964; NRCS, 2004). Éste emplea tres variables para determinar el escurrimiento directo real: la precipitación, la abstracción inicial y la infiltración potencial máxima (ver ecuación 1). Esta última variable está relacionada con el número de curva CN que a su vez depende del complejo hidrológico suelo-vegetación-tratamiento (SVT). El SCS ha establecido categorías de SVT y asignado empíricamente a cada una un valor de CN, el cual luego es modificado según la humedad antecedente (Chow et al. 1994; Maidment 1992; Orsolini et al. 2000). El valor del CN representa la fracción porcentual de la precipitación que escurre superficialmente en una cuenca después de considerar los efectos combinados de tipo de suelo, cobertura vegetal, tratamiento, condición de humedad antecedente y condición hidrológica. En el manual TR-55 del SCS (1972) se detallan las tablas que relacionan las curvas número con condiciones promedios de humedad antecedente para combinaciones específicas de grupos hidrológicos de suelo, cubierta, tratamiento y condición hidrológica. Los suelos son clasificados en uno de los cuatro grupos hidrológicos de suelo de acuerdo a su velocidad

de infiltración máxima, el tipo de cobertura usualmente se determina a partir de datos de campo, fotos aéreas, mapas o imágenes satelitales mientras que el tratamiento describe el manejo de las tierras cultivadas. La condición hidrológica se basa en una combinación de factores que afectan la infiltración y el escurrimiento y se clasifica como buena, aceptable y mala, según los criterios del manual TR-55.

El método del SCS se utiliza especialmente para el cálculo del escurrimiento en cuencas con insuficiencia de datos. Dado un evento lluvioso, el escurrimiento directo Q es siempre menor o igual a la cantidad de precipitación P . El método se basa en dos hipótesis: la primera es que al principio de la lluvia existe una cantidad de precipitación, llamada abstracción inicial para la cual no habrá escurrimiento, de donde se deduce que el escurrimiento potencial es la diferencia entre la precipitación y la abstracción inicial ($P-I_a$). La segunda establece que la relación entre el volumen de agua infiltrado en la cuenca ($P-I_a - Q$) y su valor máximo posible S , es igual a la relación entre Q y ($P-I_a$). Entonces la ecuación del volumen de escurrimiento en una cuenca hídrica, expresado en altura al dividir dicho volumen por el área de la cuenca, es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

La abstracción inicial considera todas las pérdidas antes de que comience el escurrimiento. Esto incluye el agua retenida en las depresiones superficiales, agua interceptada por la vegetación, evaporación e infiltración. La es muy variable pero generalmente se relaciona con parámetros de tipo de suelo y cobertura vegetal (Tucci, 1994). Varios autores han estudiado la relación entre I_a y S y han propuesto una relación lineal con diferentes valores para el coeficiente de proporcionalidad, los cuales varían entre 0,095 y 0,38, con un valor medio de 0,2 para cuencas rurales. Se incorpora entonces al método CN la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0,2 * S \quad (2)$$

El valor promedio de 0,2 se obtiene de numerosas pruebas de campo realizadas en cuencas rurales de 10 hectáreas y con una precipitación de más de 600 mm anuales. Al combinar las ecuaciones (1) y (2) se obtiene una expresión que emplea S y P para hallar el escurrimiento:

$$Q = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{(P + 0,8 * S)} \quad (3)$$

El SCS obtuvo empíricamente una familia de CN, cada uno de los cuales relaciona los volúmenes de precipitación y escurrimiento para un determinado valor de la infiltración potencial máxima S . Las curvas se numeran de 0 a 100, correspondiendo el valor 100 a infiltración y abstracción inicial nulas. La relación, cuando S se expresa en pulgadas como volumen de infiltración por unidad de área, es la siguiente:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4)$$

El valor de S está relacionado a su vez con las características del complejo suelo-vegetación-tratamiento (SVT).

Por último, este método combina las características anteriormente nombradas con la Condición de Humedad Antecedente (CHA), que es el contenido de agua presente en el suelo en un momento dado; su valor refleja el efecto de la infiltración en el volumen y velocidad de escurrimiento (Singh 1992), siendo la condición I para suelos secos, la III suelos saturados y la II condiciones intermedias; se considera la lluvia caída en los 5 días previos al evento a modelar y diferenciando si la estación es de crecimiento o latencia. El SCS generó una tabla, donde se combinaron todos los complejos SVT y sus CN correspondientes para la condición II de humedad antecedente y pendiente moderada (USDA 1986); (Chow et al. 1994). Silveira et al. (2000) propusieron una metodología para estimar la humedad de una cuenca previo a una precipitación mediante un índice de humedad antecedente computando 15 días.

Cuanto mayor es el CN, mayor es el escurrimiento Q , si bien la relación entre ambos no es lineal. Los principales factores para determinar el CN son: grupos hidrológicos de suelos, tipo de cobertura, uso y tratamiento del suelo. El CN es por lo tanto un indicador de la potencialidad de un área de terreno con pendiente moderada para producir escurrimiento. Los valores de CN provistos por el SCS fueron determinados a escala de unidades areales con similares características SVT y pendiente moderada.

En el método del SCS se asigna a S un valor único para toda la cuenca, que corresponde a un valor medio de CN. Dicho valor medio es evidentemente un promedio ponderado de todos los valores de CN asociados a los tipos SVT presentes en la cuenca. Sin embargo, la pendiente influye en el escurrimiento potencial en la escala en que lo estamos tratando (área de un píxel, o en general área elemental). Por otra parte se ha reportado (Puricelli 2008) que a medida que aumenta el grado de promedio en los valores de CN, el método pierde precisión, provocando errores por exceso en la estimación de volúmenes de escurrimiento.

Colectar la información de campo con técnicas "in situ" consumen tiempo y dinero, una alternativa para medir la cantidad y condición de la vegetación se basa en analizar medidas espectrales captadas por sensores satelitales (Goel y Norman 1992). Dado que los parámetros de entrada más importantes al modelo del SCS son uso del suelo y tipo de suelos, este modelo es potencialmente compatible con datos satelitales (Shi et al. 2007). Al poder determinar, a partir de imágenes satelitales, información relacionada con la cobertura presente en un área, se abre la posibilidad de caracterizar el escurrimiento potencial en cada píxel de una imagen. Variadas investigaciones se han realizado tendiendo a reducir el dato de múltiples bandas a un solo valor de píxel para estimar características de las cubiertas vegetales. Uno de los primeros índices de vegetación que han tenido éxito fue desarrollado por Rouse et al. (1973) basado en

la relación entre dos bandas, una en la región del visible y otra en el infrarrojo, cuanto mayor sea el valor del índice en un píxel mayor es la cantidad de vegetación fotosintetizante presente. Otro índice muy importante en estudios de vegetación es la denominada transformación Tasseled Cap desarrollada por Kauth y Tomas (1976) usando datos del sensor MSS y posteriormente evaluada para TM por Crist y Cicone (1984).

En el presente trabajo se propone una metodología para estimar un índice de escurrimiento superficial potencial para cada píxel, basado en datos edáficos y en dos parámetros obtenibles a partir de datos satelitales ópticos y radar: por una parte, la identificación de los complejos vegetación-tratamiento utilizada para calcular el valor de CN , y por otra, la pendiente del terreno generada a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM).

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de grupos hidrológicos, clases SVT y pendientes del terreno

Se propuso y desarrolló una metodología para la estimación del complejo SVT a través de la clasificación de imágenes satelitales y su integración con datos edáficos y topográficos. En la Figura 1 se observa el diagrama de flujo de todos los pasos seguidos en este trabajo.

La metodología consistió en las cuatro siguientes etapas: i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica; ii) Mapa de Número de Curva; iii) Mapa de pendientes y iv) Mapa de Índice de escurrimiento Potencial.

i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica

En la primera etapa se calibró radiométrica y geométricamente la imagen y se clasificó con el programa Erdas Imagine 8.4 para extraer la información de la cobertura vegetal. La atmósfera presente entre el terreno y el sensor introduce perturbaciones y la energía grabada por el sensor no es la misma que aquella reflejada o emitida por la superficie. La radiación solar en su viaje en el vacío no es afectada, pero al interactuar con la atmósfera es dispersada o absorbida selectivamente, según la longitud de onda (Jensen 1996), la región del infrarrojo está prácticamente libre de los efectos de la atmósfera mientras que la región del visible es fuertemente influenciada por ésta. De allí la importancia de la calibración radiométrica cuando se utilizan diferentes bandas para derivar índices. Por otra parte, en la calibración geométrica se utiliza el método de remuestreo del vecino más cercano ya que el valor del píxel no es alterado en el proceso (Duggin y Rodinove 1990). El método más comúnmente utilizado para medir el error de la corrección geométrica es el error medio cuadrático (RSM error) para cada punto de control individual y total para la imagen completa. (Ton y Jain 1989) siendo el error aceptado menor a un píxel.

Se procesaron los datos originales para obtener nuevas capas de información, con las cuales derivar las características del complejo Vegetación-Tratamiento. Se calcularon el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el NDTI Normalized Difference Tillage Index (Zhongming et al. 2010), y tres nuevas capas de información mediante la denominada Transformación Tasseled Cap: Brillo, Verdor y Humedad. La variable Brillo indica el albedo a través de las reflectancias en tres bandas del espectro visible, la variable Verdor indica la presencia de vegetación mediante el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo cercano y la variable Humedad se relaciona con el contenido de agua en suelos y vegetación y está asociada con la reflectancia en el infrarrojo medio (Chuvieco 2002).

Con estas nuevas bandas obtenidas se realizó una clasificación, donde cada píxel de la imagen es asignado a una clase determinada mediante el algoritmo de clasificación ISODATA (Tou y Gonzalez 1977; Jain 1989). Previo al proceso de clasificación es necesario definir la lista de todas las clases de interés (Gong y Howarth 1992). Las clases utilizadas en la clasificación fueron las que el SCS utiliza para definir los valores de CN en los complejos SVT. El resultado final de esta primera etapa es el mapa de uso de suelo y condición hidrológica de la vegetación.

ii) Mapa de Número de Curva

Los datos de suelos fueron obtenidos a partir de cartas de suelo del INTA escala 1:50.000, donde se delimitan las unidades cartográficas. Cada unidad cartográfica fue asignada a uno de los cuatro grupos hidrológicos comparando sus características texturales y de drenaje con las descritas exhaustivamente en la bibliografía (*National Engineering Handbook, Section 4-Hydrology 1964; Singh 1992*). Se han reportado diferentes estrategias para la asignación de los suelos a los grupos hidrológicos, por ejemplo la utilización de un mapa de capacidad de drenaje, de la cartografía digital del INTA 1:500.000 como apoyo para esta asignación (Bacchiaga et al. 2010) o estimando la conductividad hidráulica saturada de cada horizonte por medio de la utilización de funciones de pedotransferencia (Crededio et al. 2010)

Los datos vectoriales de suelos fueron convertidos a raster para integrarlos a los datos de vegetación en un entorno SIG. Con la clasificación anterior se obtuvieron los datos de cobertura y uso del suelo y luego se añadieron los datos de grupo hidrológico para así generar un nuevo mapa donde cada clase SVT tiene asignada un valor de CN.

iii) Mapa de pendientes

En la tercera etapa de la metodología se determinó la pendiente del terreno, calculada a partir de datos de elevación del Shuttle Radar Topography Misión, SRTM con 90 m de resolución. (Jarvis et al. 2008). La pendiente fue calculada en grados y luego convertidas a radianes, pues así lo requiere la siguiente etapa. La pendiente influye en el escurrimiento superficial pues la velocidad de desplazamiento en manto en el píxel considerado es proporcional a aquella. A su vez, un desplazamiento más rápido reduce la infiltración en el píxel considerado.

iv) Mapa de Índice de escurrimiento Potencial

El SCS obtuvo empíricamente una familia de números de curva CN, cada uno de los cuales relaciona los volúmenes de precipitación y escurrimiento para un determinado valor de la infiltración potencial máxima S en la cuenca bajo análisis. Dicha infiltración, con un valor único válido para la cuenca - considerada como una unidad de escurrimiento e infiltración - a su vez, está relacionada en forma inversa y no lineal con el CN. Un valor de CN igual a 100 indica infiltración potencial máxima nula (ver ecuación 4). En el otro extremo, un valor nulo de CN indica que toda el agua de lluvia se infiltra y el escurrimiento es nulo.

En el método del SCS, el valor único de S para la cuenca corresponde a un valor medio de CN para la misma. Dicho valor medio es evidentemente un promedio ponderado de todos los valores de CN asociados a las unidades areales (por ejemplo, lotes cultivados) presentes en la cuenca, cada una de las cuales tiene asociado un valor de SVT. La pendiente del terreno no está incluida en la ecuación (3) del SCS, pues el estudio

y posterior clasificación realizado por este organismo consideró solamente cuencas con pendiente media moderada.

Sin embargo, la pendiente influye en el escurrimiento potencial en la escala en que lo estamos tratando (área de un píxel, o en general área elemental); el escurrimiento aumenta con la pendiente (Maidment 1992; Chow et al 1994). Por otra parte, Puricelli (2008) mostró que a medida que aumenta el área considerada y por consiguiente el grado de promedio areal en los valores de CN, el método pierde precisión, provocando errores por exceso en la estimación de volúmenes de escurrimiento.

En virtud de estas consideraciones proponemos un índice de escurrimiento potencial que aumente con la pendiente del área elemental considerada, y que a la vez sea directamente proporcional al valor de CN correspondiente a dicha área. La expresión propuesta para el cálculo del índice de escurrimiento potencial, de acuerdo con las consideraciones expuestas, es la siguiente:

$$Ie_{pot} = CN * (0,1 + Slope / Slope_{max}) \quad (5)$$

donde Ie_{pot} es el Índice de escurrimiento potencial, Slope es la pendiente y $Slope_{max}$ es la pendiente máxima esposable (tangente trigonométrica del ángulo).

Dado el tamaño del píxel (30m de lado) se fijó el valor de $Slope_{max}$ igual a 0,7; este valor máximo es función de la resolución espacial usada, debiendo usarse un valor menor si el tamaño del píxel es mayor, ya que la integración areal disminuye la pendiente media del terreno. Para el tamaño de píxel considerado en el presente trabajo el valor de $Slope_{max}$ solo podría ser alcanzado en zonas extremadamente escarpadas (Chow et al 1994).

Con la expresión propuesta el índice varía entre 0 y 100. El término 0,1 se ha incluido para tener en cuenta la pendiente de la superficie del agua que inunda el terreno en zonas de llanura, la cual puede ser distinta de la pendiente del terreno Slope y originar escurrimiento aún sobre terreno horizontal debido a la transferencia de cantidad de movimiento por parte del viento. Esta ecuación fue aplicada a cada uno de los píxeles de la imagen con el fin de determinar el índice de escurrimiento potencial en cada uno de ellos. En la Figura 1 se resumen los pasos metodológicos llevados a cabo en el presente trabajo.

ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se llevó a cabo en la cuenca del Río Azul, sector conocido como Cañadón de Gutiérrez, Partido de Azul, Provincia de Buenos Aires. La zona de estudio está ubicada al Sur de la Ciudad cabecera del Partido. En su extremo Sur se encuentra la divisoria del Cerro La Armonía y los límites Este y Oeste están constituidos por divisorias secundarias. El área de estudio cuenta con una superficie superior a las 39.000 has, con cotas que van desde los 255 m s.n.m. en su parte Sur hasta los 118 m s.n.m. en la zona Norte (Figura 2). Desde el punto de vista geomorfológico está ubicada en el Sudoeste de la Pampa Deprimida, en una zona de transición entre la zona Pedemontana de las Sierras de Tandilla y la zona de los Derrames (Moscatelli y Scoppa 1983).

Los suelos presentes son Argiudoles y Hapludoles típicos y líticos en las zonas elevadas y Hapludoles thapto árgicos y Natracuoles someros en zonas más deprimidas. Los datos climáticos de la región son: precipitación media anual 880 mm para

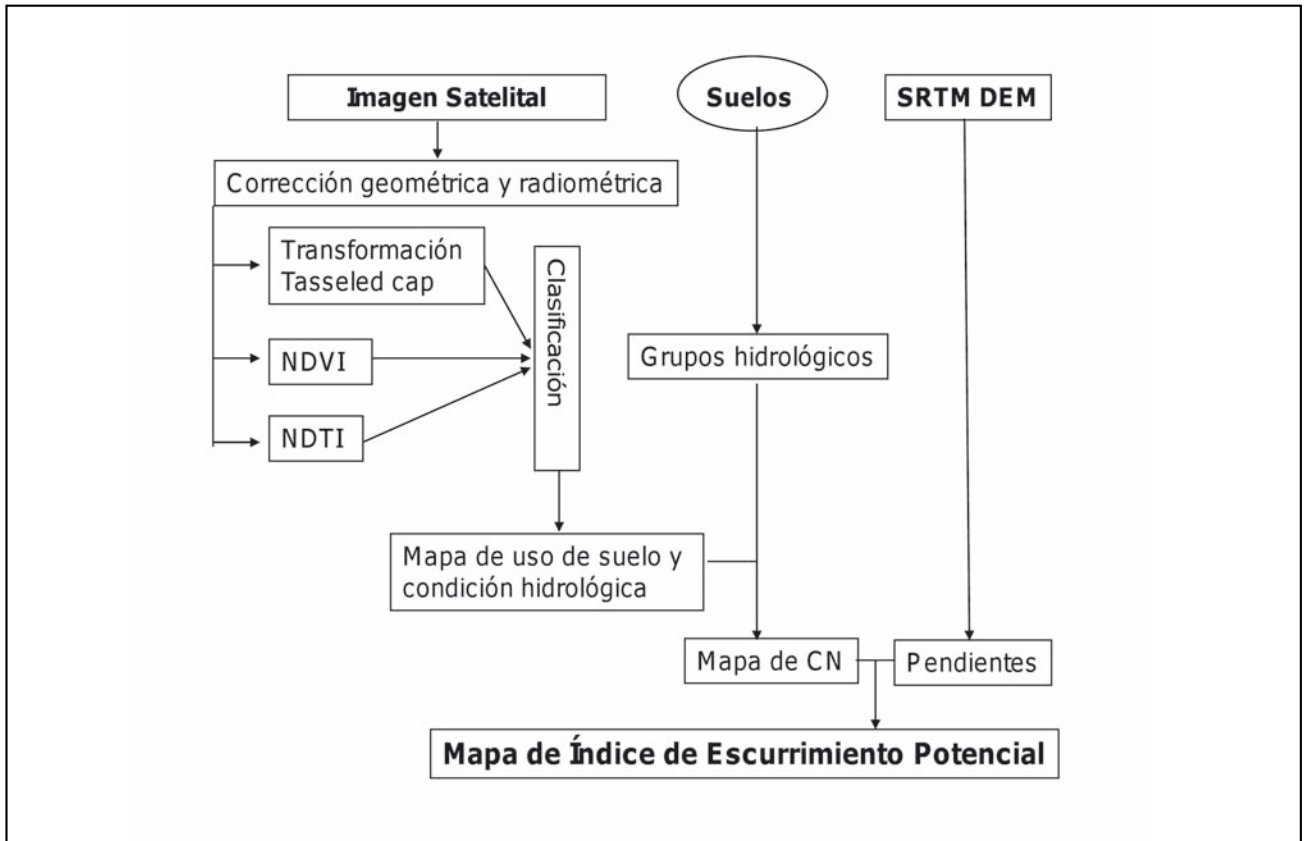


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

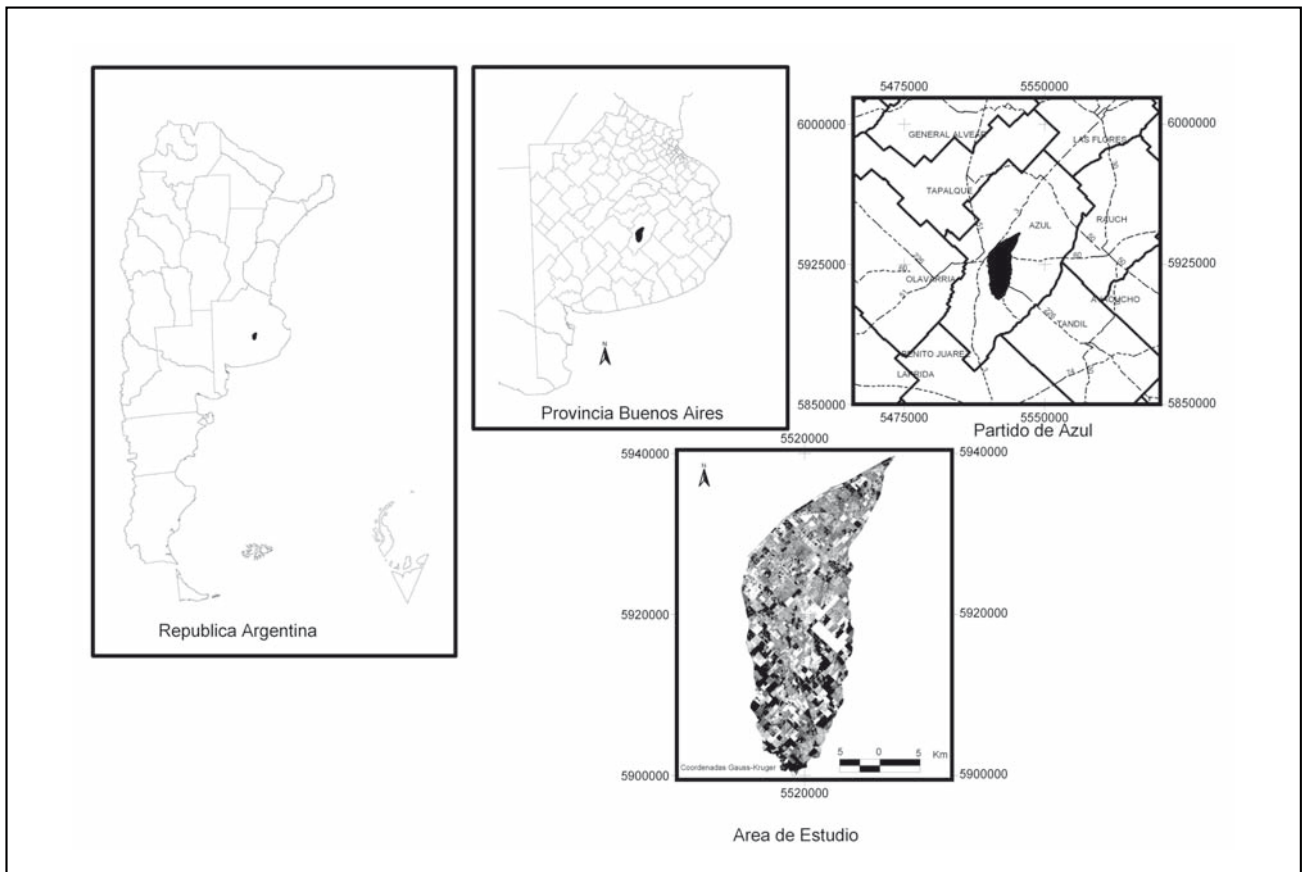


Figura 2. Ubicación del área de estudio en el partido de Azul, Provincia de Buenos Aires.

el periodo 1910-1980; la temperatura media del mes de enero es de 21,3 °C y la temperatura media del mes de Julio de 7 °C; la evapotranspiración potencial anual es de 753 mm indicando que la zona muestra un ligero déficit hídrico en verano y excesos en el invierno.

Datos utilizados

Se trabajó con una imagen satelital adquirida el 26 de febrero de 2011 por el sensor Landsat TM correspondiente al Path 225 Row 86 de acuerdo al sistema de referencia mundial. Por otro lado, se establecieron los Grupos Hidrológicos de suelos a partir de cartas del INTA, escala 1:50.000. Se utilizó un modelo digital de elevación de terreno (DEM) elaborado a partir de los datos proporcionados por el proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una precisión vertical de 5 a 6 metros globalmente y de alrededor a 2 metros o menos en áreas planas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el resultado de la clasificación, utilizando los índices generados a partir de la imagen radiométricamente corregida,

obtenemos el mapa de Usos de suelo y condición hidrológica (Figura 3). Las clases usadas en la clasificación se seleccionaron a partir de las coberturas del complejo SVT del SCS y en el área estudiada encontramos 5 clases: “Cultivos” en “Buenas” y “Malas” condiciones hidrológicas, “Pastos” en condiciones “Buenas” y “Regulares” y “Rastrojos”, en cuanto al manejo de la cobertura, en el área solamente se realiza en hileras rectas y no en curvas de nivel. La condición hidrológica pudo ser diferenciada al incluir el NDVI y la banda Verdor del Tasseled cap en la clasificación, donde los valores más altos correspondieron a mejores condiciones de la vegetación. Mientras que al utilizar el NDTI y banda Brillo del Tasseled cap los lotes con rastrojos son clasificados sin ninguna confusión.

En el área de estudio se encuentran presentes 31 unidades cartográficas (UC) de suelos, cada una de las cuales fue asignada al grupo hidrológico B o C, no habiéndose encontrado suelos pertenecientes a los grupos hidrológicos A ni D. Cada UC está integrada por 1 a 4 series de suelos en distintas proporciones; sobre la base de sus características físicas y de drenaje y de la proporción en que cada grupo hidrológico está presente, les fueron asignadas las clases B o C (Tabla 1).

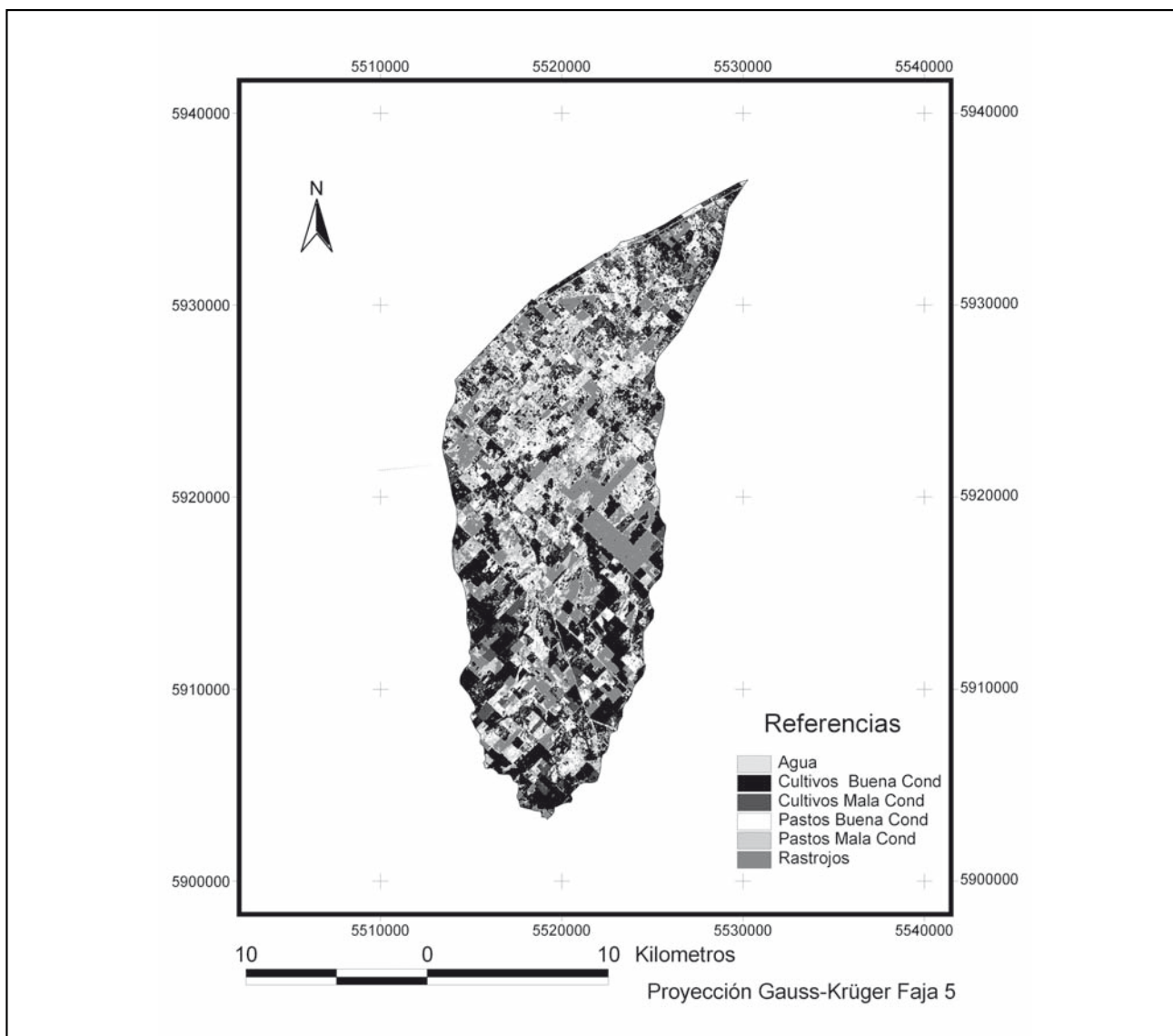


Figura 3. Mapa de Uso de Suelos y Condición Hidrológica (SVT).

Tabla 1. Unidades cartográficas presentes en la zona de estudio, descripción de las dos primeras series y grupo hidrológico asignado. (B.: Bien drenado; I: Imperfectamente drenado; M: Moderadamente bien drenado; AE: Algo excesivamente drenado; P: Pobremamente drenado).

UC	GH	Tipo	SERIE 1	DRENAJE	%	SERIE 2	DRENAJE	%
Ta3	C	Comp.	Tandil	B	25	Azul	B	25
MP9	B	Comp	Mar del Plata	B	30	Balcarce	B	30
MP1	B	Comp	Mar del Plata	B	35	Mar del Plata	B	35
Bal27	B	Comp.	Balcarce	B	40	Mar del Plata	B	30
EaA3	C	Comp	Estancia Aldecoa	I	40	Napaleufú	P	30
TEs5	B	Comp	Tres Esquinas	M	40	La Barrancosa	I	30
Bal26	B	Comp.	Balcarce	B	40	Dos Naciones	B	40
Che8	C	Comp	Chelforó	I	45	General Guido	I	20
BCh1	B	Comp	Blanca Chica	B a M	45	La Nueva Esperanza	M	35
LEs5	C	Comp.	La Escocia	I	50	Miñana	I	20
BCh6	B	Comp	Blanca Chica	B a M	50	La Nueva Esperanza	M	30
MP38	B	Comp	Mar del Plata	B	50	Balcarce	B	30
Bal4	B	Comp.	Balcarce	B	50	Mar del Plata	B	40
Ta33	B	Comp	Tandil	B	50	Santa Luisa	M	50
Bal6	B	Comp	Balcarce	B	60	Blanca Chica	B a M	30
GG28	C	Comp.	General Guido	I	60	Ayacucho	M	30
Bal3	B	Comp	Balcarce	B	60	Balcarce	B	30
Ta30	B	Comp	Tandil	B	60	Azul	B	40
Ta31	B	Comp.	Tandil	B	65	Azul	B	30
Ta32	B	Comp.	Tandil	B	70	Miñana	I	20
MP4	B	Comp	Mar del Plata	B	70	Balcarce	B	30
MP8	B	Comp	Mar del Plata	B	70	Balcarce	B	30
EaA	C	Asoc.	Estancia Aldecoa	I	75	Laprida	B	25
BCh2	B	Consoc.	Blanca Chica	B a M	80	La Nueva Esperanza	M	20
MP2	B	Consoc	Mar del Plata	B	80	Balcarce	B	20
SP5	C	Consoc.	Sierra de los Padres	B a AE	100			0
LEs15	C	Consoc	La Escocia	I	100			0
BCh	B	Consoc.	Blanca Chica	B a M	100			
MP17	B	Consoc	Mar del Plata	B	100			
Ta20	B	Consoc.	Tandil	B	100			
Que	C	Consoc	Querandíes	P a I	100			

A la clasificación de las coberturas se le sumaron los datos de suelo, para así generar una nueva imagen donde a cada clase le corresponde un valor de CN específico. Se obtuvieron cinco tipos de cobertura del suelo y en la cuenca existen dos grupos hidrológicos por lo que la nueva capa de información final tendrá 10 valores de CN como máximo. Estos valores de CN fueron calculados para una Condición de Humedad Antecedente normal (CHA II), en la Tabla 2 se detallan estos valores para las clases SVT halladas, y en la Figura 4 se muestra el mapa correspondiente, donde el rango de variación de los valores de CN es de 61 a 91. En la Tabla 3 se indican los CNs correspondientes a CHA I, donde los suelos están suficientemente secos para ser cultivados y poseen un menor potencial de escurrimiento y para CHA III con mayor potencial de escurrimiento debido a que los suelos están saturados por precipitaciones anteriores.

En la Figura 5 se muestra el mapa de pendientes (expresado en grados angulares) obtenido a partir de imágenes SRTM de 90 m de resolución espacial; mediante una desagregación espacial se obtuvo el mapa de pendientes en un reticulado cuadrado de 30 metros de malla para hacerlo compatible con la resolución de los mapas anteriores. Las pendientes halladas en la cuenca varían de 0 a 5,97°.

Finalmente en la Figura 6 se observa el resultado de la aplicación de la ecuación (5), donde a cada píxel de la imagen le corresponde un determinado valor de índice de escurrimiento potencial. Los valores que adopta este índice cuando los CNs son calculados para CHA normales tienen un rango de 0 a 22,65; mientras que para CHA I varía entre 0 y 19,66 y para CHA III de 0 a 24,14.

Tabla 2. Valores de CN (CHA II) presentes en la clasificación final.

Determinación de la CN según Suelos, Vegetación y Manejo				
Cobertura		Condición hidrológica	Grupo hidrológico de los Suelos	
Uso de suelo	Manejo		B	C
Barbecho o rastrojos	Hileras rectas	Mala	86	91
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Buena	78	85
	Hileras rectas	Mala	79	86
Praderas y Pastizales	Hileras rectas	Buena	61	74
	Hileras rectas	Regular	69	79

Tabla 3. Valores de CN correspondientes para CHA I (secas) y CHA III (saturadas).

CN para CHA II	CNs Correspondientes	
	CHA I	CHA III
61	40	78
69	51	85
74	57	88
78	61	90
79	62	91
85	70	94
86	71	95
91	79	97

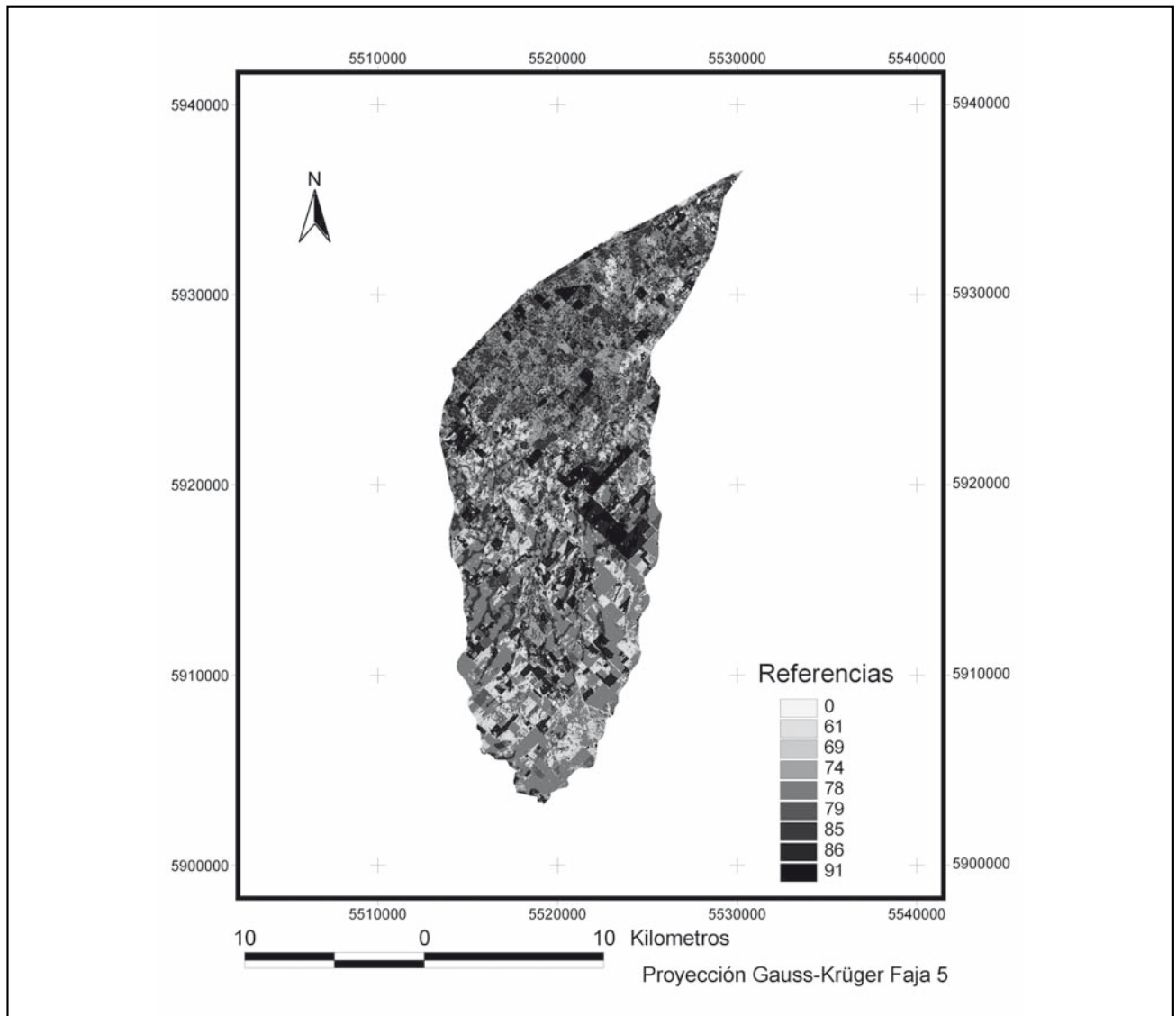


Figura 4. Mapa de Curva Número (CN).

CONCLUSIONES

La definición y determinación del índice de escurrimiento potencial basado en la clasificación SVT del SCS y en la pendiente del terreno, aplicados a cada píxel de una imagen, constituye una buena alternativa para la caracterización hidrológica del terreno debido a la facilidad de acceso a los datos necesarios para su aplicación.

Se ha probado que es posible estimar la tasa potencial de escurrimiento en áreas elementales o parcelas de terreno a partir de datos satelitales y edáficos.

La metodología utilizada ofrece una herramienta de altísima definición a nivel de cuenca y la información que se genera abre la posibilidad de ser incorporadas como entrada a modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, con unidades elementales compuestas por celdas coincidentes con píxeles.

El algoritmo de clasificación digital de imágenes satelitales no es excluyente de la metodología aquí propuesta. Otros métodos han sido aplicados en estudios previos como clasificación orientada a objetos o clasificación por árbol (Presutti 2003; Presutti et al. 2010).

Debido a que los resultados pertenecen a una fecha precisa, no es correcto utilizarlos para estimar el escurrimiento potencial en otra época del año, ya que, si bien no cambian las características de pendiente y grupo hidrológico del suelo, sí lo hacen en general las características del complejo SVT (en el caso de cultivos, debido a la rotación de los mismos y al estado fenológico) y la Condición de Humedad Antecedente. Si, para un caso particular tratado, puede asumirse que la clasificación SVT no cambia durante el año o durante un período menor (por ejemplo, una estación climática), entonces el índice de escurrimiento potencial puede considerarse válido para el lapso en cuestión.

Nos planteamos como etapa siguiente considerar la variabilidad del factor SVT durante las principales estaciones del año para la cuenca estudiada y elaborar los mapas de I_e pot para las distintas condiciones de humedad antecedente: CHA I, CHA II y CHA III. La cuantificación del índice de escurrimiento potencial en estas diferentes condiciones permitirá la aplicación de esta metodología durante todo el año.

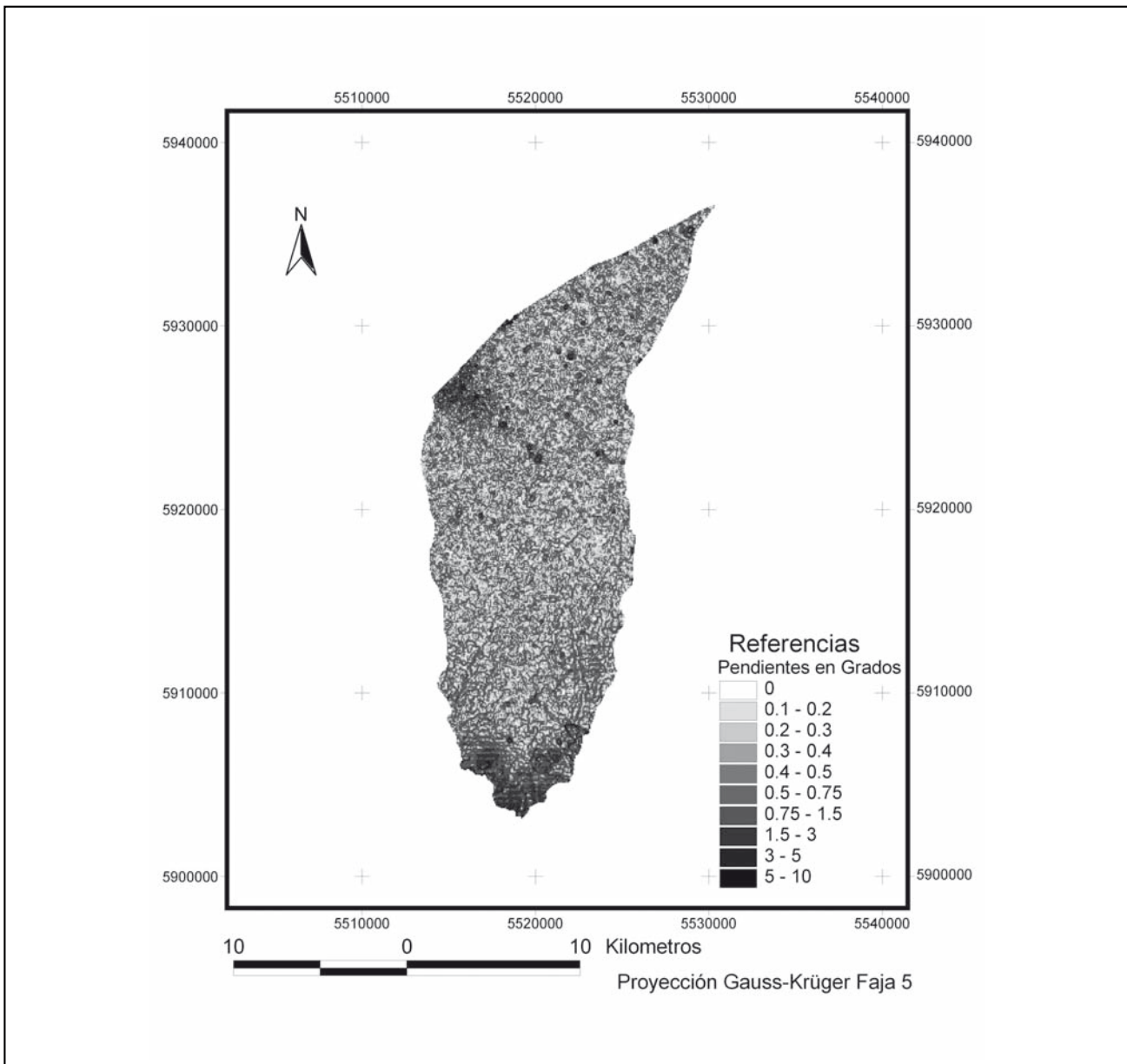


Figura 5. Mapa de pendientes.

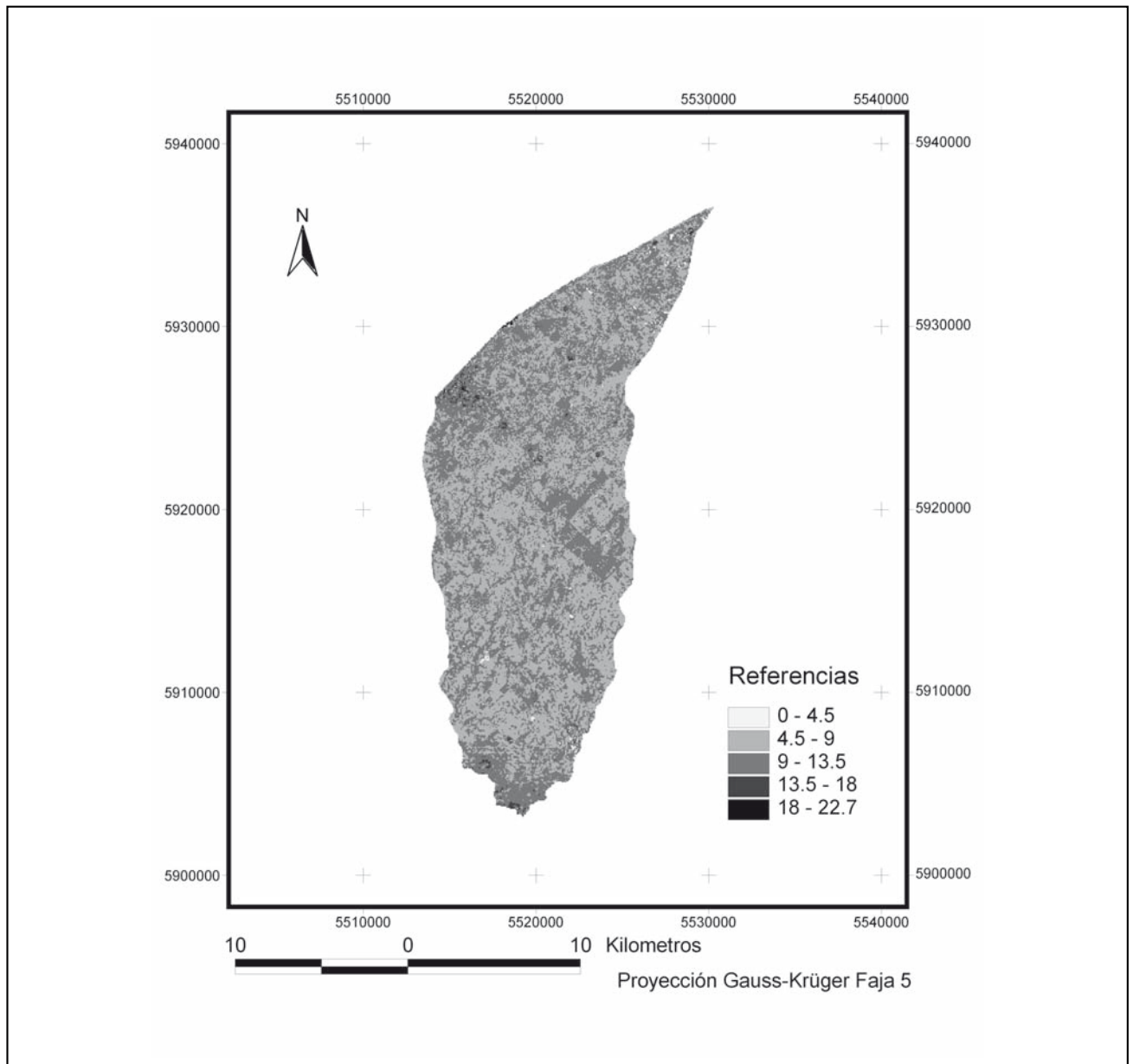


Figura 6. Mapa de Índice de Escurrimiento Potencial para CHA II.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BACCHIEGA J. D., M. C. LOPARDO, H. D. BARRIONUEVO, J. A. HASPERT, 2010
 Determinación del CN a Partir de Imágenes Satelitales.
XXIV Congreso Latinoamericano De Hidráulica Punta Del Este, Uruguay, Noviembre 2010
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. Y MAYS, L. W., 1994.
 Hidrología Aplicada.
McGraw Hill. Bogotá.
- CHUVIECO E., 2002.
 Teledetección Ambiental.
Ediciones ARIEL S.A. España.
- CREDEDIO D.A., M.G. ARES Y M. VARNI, 2010
 Análisis de la variación temporal del escurrimiento potencial en función del suelo y sus usos en la cuenca del arroyo Santa Catalina.
I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina -pp 177-184

- CRIST E.P. Y R.C. CICONE, 1984.
Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 50: 343-352
- DUGGIN J. Y C.J. RODINOVE, 1990.
Assumptions Implicit in Remote sensing data Acquisition and Analysis.
International Journal of Remote Sensing 11 (10): 1669-1694.
- GOEL N.S. Y M. NORMAN, 1992.
Biospheric models Measurements and Remote Sensing of vegetation.
International Journal of Remote Sensing 47:163-188.
- GONG P. Y P. HOWARTH, 1992.
Frequency-based Contextual Classification and Gray level vector reduction for land-use identification.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58 (4): 423-437.
- JAIN A.K., 1989.
Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood Cliffs.
Prentice Hall pp 418-421.
- JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON Y E. GUEVARA, 2008,
Hole-filled seamless SRTM data V4,
International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- JENSEN J.R., 1996.
Introductory digital image processing: a Remote Sensing perspective 2nd ed.
Prentice Hall 316 pp.
- KAUTH R.J. Y G.S. THOMAS, 1976.
The Tasseled Cap- A graphic description of the spectral-temporal development of Agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed data. West Layayette.
In: Laboratory for Applications of Remote Sensing, pp 41-51.
- MAIDMENT, D. R., 1992.
Handbook of Hydrology.
McGraw Hill, Nueva York.
- MOSCATELLI, G. Y C. SCOPPA, 1983.
Características Hidroedáficas de la Pampa Deprimida.
Coloquio Internacional sobre Hidrología de Llanuras. Olavarría, Argentina.
- NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK, SECTION 4 - HYDROLOGY, 1964.
Chapter 10: Estimation Of Direct Runoff from Storm Rainfall.
US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, US Govt Printing Office, Washington, DC.
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS), 2004.
Part 630 Hydrology.
National Engineering Handbook Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall
- ORSOLINI, H. E.; ZIMMERMANN, E. D. Y BASILE, P. A., 2000.
Hidrología: Procesos y Métodos.
Editora UNR, Rosario.
- PRESUTTI M., 2003
"Clasificación Orientada a Objetos de Imágenes Satelitales: su Aplicación en la Estimación del Escurrimiento Superficial de una Cuenca Hidrográfica."
XII Congreso Nacional de Fotogrametría, La Plata, 17 al 19 Setiembre 2003. Organizado: Dirección de Geodesia, Pcia de Buenos Aires. Actas en CD-ROM
- PRESUTTI M., G. CALVO, D. BARRERA Y H. ROSATTO, 2010.
Estimación del escurrimiento potencial basado en la clasificación hidrológica del SCS, imágenes satelitales y clasificador "expert classifier"
Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina 21 al 24 de septiembre de 2010.
Editores: Marcelo Varni, Ilda Entraigas. Luis Vives Editorial Martin ISBN: 978-987-543-393-9
- PURICELLI, M.M., 2008.
Problemas de escala en la utilización del método de Curva Número (CN).
En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Potrero de los Funes. San Luis.
- ROUSE J.W, R.H HAAS, J.A. SCHELL Y D.W. DEERING, 1973.
Monitoring Vegetations Systems in the Great Plains with ERTS.
Proceedings 3er ERTS Symposium Vol 1 pp 48-62

- SHI P.J., Y. YUAN, J. ZHENG, J.A. WANG , Y. GE, G. Y QIU, 2007.
The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region,
China Catena 69 31- 35
- SILVEIRA, L., F. CHARBONNIER Y J.L. GENTA, 2000.
The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure.
Hydrological Sciences Journal, 45 (1), 3-12.
- SINGH V.P., 1992.
Elementary Hydrology.
Prentice Hall, New York.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS), 1972.
National Engineering Handbook, section 4, Hydrology.
U.S. Soil Conservation Service, Department of Agriculture, Washington DC,
- TON J. Y A.K. JAIN, 1989.
Registering Landsat Images by point Matching IEEE
Transactions on geoscience and Remote Sensing 27 (5): 642-651.
- TOU J.T Y R.C GONZALEZ, 1977.
Pattern Recognition Principles.
Reading MA Addison-Wesley, 371 p.
- TUCCI, C. M., 1994.
Hidrología - Ciencia y Aplicación.
Editora da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- USDA, 1986.
Urban Hydrology for Small Watersheds.
U.S. Dept. Agric. Soil Conservation Service, Tech. Release 55(210.VI-TR-55), 2nd Edition.
- ZHONGMING W., LEES B.G., FENG J., WANNING L. Y HAIJING S., 2010.
Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion.
Catena 83 87-93